



УДК 533.17

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЭЖЕКТОРА ДЛЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ АНОДНЫХ  
ГАЗОВ****ANODE OFF-GAS RECIRCULATION EJECTOR  
MODELLING AT VARIOUS OPERATION MODES**

**Ершов Михаил Игоревич**, магистрант каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ershov1807@gmail.com, Тел.: +7(912)652-06-38

**Волкова Юлия Владимировна**, к-т. техн. наук, старший преподаватель каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: gibridsofc@gmail.com. Тел.: +7(902)877-96-06

**Мунц Владимир Александрович**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.munts@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-45-67

**Mikhail I. Ershov**, Master student, Department «Heat and Power Engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ershov1807@gmail.com. Ph.: +7(912)652-06-38

**Yulia V. Volkova**, Candidate Sc., Assistant Prof., Department «Heat and Power Engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gibridsofc@gmail.com. Ph.: +7(902)877-96-06

**Vladimir A. Munts**, Doctor Sc., Prof., Department «Heat and Power Engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.munts@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-45-67

**Аннотация:** В статье приведены методики расчета состава уходящего анодного газа, степени рециркуляции, обеспечивающей протекание реакций риформинга с отсутствием сажеобразования, а также коэффициента инжекции эжектора в схеме с рециркуляцией анодных газов для различных режимов работы установки.

**Abstract:** The article includes methods for calculation of the anode off-gas equilibrium chemical composition, anode off-gas recirculation ratio at which the carbon deposition fails to occur in the reformer and fuel cell anode channel and the ejector's entrainment ratio for the SOFC power unit with anode off-gas recirculation at various operation modes.

**Ключевые слова:** твердооксидные топливные элементы; моделирование; эжектор; рециркуляция анодных газов.

**Key words:** solid oxide fuel cells; modelling; ejector; anode off-gas recirculation.

**ВВЕДЕНИЕ**

Топливные элементы, позволяющие осуществить прямое преобразование химической энергии топлива в электричество, сегодня находят все более широкое применение не только на объектах специального назначения (подводные лодки, космические аппараты, военная техника и т.д.), но и в других отраслях. Для малой распределенной энергетики наиболее привлекательными являются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), поскольку в качестве окислителя в них можно использовать воздух, а не чистый кислород, а в качестве топлива – синтез-газ. Одним из основных достоинств ТОТЭ является отсутствие

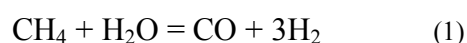
необходимости использования платины в качестве катализатора, поскольку они работают при высокой температуре (750-1000 °С) и в них можно использовать каталитические материалы, которые не отравляются оксидом углерода [1].

Самой распространенной схемой энергетической системы на ТОТЭ является схема с паровым риформингом природного газа [2]. КПД такой схемы может достигать 70%, но для ее реализации необходимо наличие источника воды с электропроводностью 3-5 мСм/см<sup>2</sup>, кроме того, чтобы избежать сажеобразования при протекании реакции паровой конверсии, в риформер

необходимо подавать воды в 2,5-3 раза больше, чем стехиометрически необходимо. А так как реакция паровой конверсии метана является эндотермической, то необходимо осуществлять подведение теплоты к риформеру. Такие особенности не позволяют широко применять данную схему при снабжении автономных и удаленных объектов. В этом случае можно применить схемы с воздушным риформером, где получение синтез-газа происходит по реакции частичного окисления метана кислородом воздуха. Такая схема будет иметь КПД существенно ниже, чем с паровым риформингом, но риформер можно сделать более компактным и соответственно размеры риформеру, что несомненно повышает автономность оборудования. Еще одна схема энергетической установки на ТОТЭ, которая обладает автономностью, как при воздушном риформинге и КПД сравнимым с паровым риформером – это установки с рециркуляцией анодных газов. В такой схеме часть уходящих из анода газов, которые состоят в основном из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , подается в риформер, где будут протекать две реакции – парового риформинга и углекислотного. Одной из основных задач при создании энергетической установки на ТОТЭ со схемой рециркуляции анодных газов является обеспечение эффективного возврата необходимого количества уходящих газов, которого достаточно для протекания реакций в риформере с отсутствием сажеобразования. Наряду с перечисленным, важным аспектом является разработка эжектора для рециркуляции анодных газов и моделирование различных режимов его работы.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОСТАВА АНОДНОГО ГАЗА И СТЕПЕНИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ

В схеме с рециркуляцией анодных газов (рис. 1), один моль исходного топлива, с условной формулой  $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_l\text{N}_q$ , подаваемого в риформер, смешивается с долей  $z$  анодных газов, затем такая смесь подается в риформер и на выходе получается синтез газ, с условной формулой  $\text{C}_{n_{sg}}\text{H}_{m_{sg}}\text{O}_{l_{sg}}\text{N}_{q_{sg}}$ , который затем подается в анодный канал. В случае с рециркуляцией в риформере протекают эндотермические реакции между исходным топливом и кислородсодержащими компонентами, содержащимися в анодном газе ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) по реакциям (1) и (2).



Чтобы рассчитать равновесный состав продуктов риформинга в этом случае можно в уравнения (3)-(7), которые верны для воздушного риформинга

[3] подставить вместо  $n$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $q$ :  $n_{sg}=n(1+z)$ ,  $m_{sg}=m(1+z)$ ,  $q_{sg}=q(1+z)$ ,  $l_{sg}=l(1+z)+z\alpha_{f,out}(2n+0,5m-l)$ .

$$M_{\text{CO}_2} = n[1 - x(1 - \alpha)], \quad (3)$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5m[1 - x(1 - \alpha)], \quad (4)$$

$$M_{\text{CO}} = nx(1 - \alpha), \quad (5)$$

$$M_{\text{H}_2} = 0,5 m x(1 - \alpha), \quad (6)$$

$$M_{\text{N}_2} = 0,5q + 0,5\Psi\alpha(2n + 0,5m - l). \quad (7)$$

где  $\alpha$  – степень поглощения кислорода,  $M$  – число молей газообразных продуктов реакции, продуктов реакции,  $x=(2n+0,5m-l)/(n+0,5m)$  – характеристика топлива, которая физически показывает возможность образования углерода (сажи) в равновесных продуктах реакции при нагреве одного топлива (без окислителя) до 900 °С или выше;  $\Psi=3,76$  (для воздуха).

Первый член  $l(1+z)$  правой части уравнения кислорода ( $l_{sg}$ ) учитывает количество кислорода, которое содержалось в исходном топливе при подаче в риформер. В энергетической установке с рециркуляцией к топливу в анодном канале ТОТЭ добавляется кислород, который диффундирует через электролит и соответствует доле от стехиометрически необходимого значения в зависимости от  $\alpha_{f,out}$ . Чтобы учесть этот добавленный в связанном виде кислород при рециркуляции, в правую часть уравнения для кислорода вводится член  $z\alpha_{f,out}(2n+0,5m-l)$ . Затем, для расчёта состава уходящего анодного газа к полученным количествам веществ  $M$  добавляют количество продиффундировавшего через электролит кислорода и заново ищут состав.

Основным параметром, влияющим на работоспособность такой схемы, является степень рециркуляции  $z$ , которая должна обеспечить протекание реакций в риформере с отсутствием сажеобразования. В свою очередь  $z$  зависит от степени использования топлива в ТОТЭ и чем последняя меньше, тем больше количества уходящих газов необходимо возвращать для получения синтез-газа. Было установлено, что при температуре в риформере выше 1073 К (800 °С) система работает без выпадения сажи при  $\alpha_{f,out}>0,6$  и  $z>0,7$  [3].

#### МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА ИНЖЕКЦИИ

Основной параметр, определяющий работу эжектора – это коэффициент инжекции, равный отношению массовых расходов инжектируемого потока к рабочему [4].

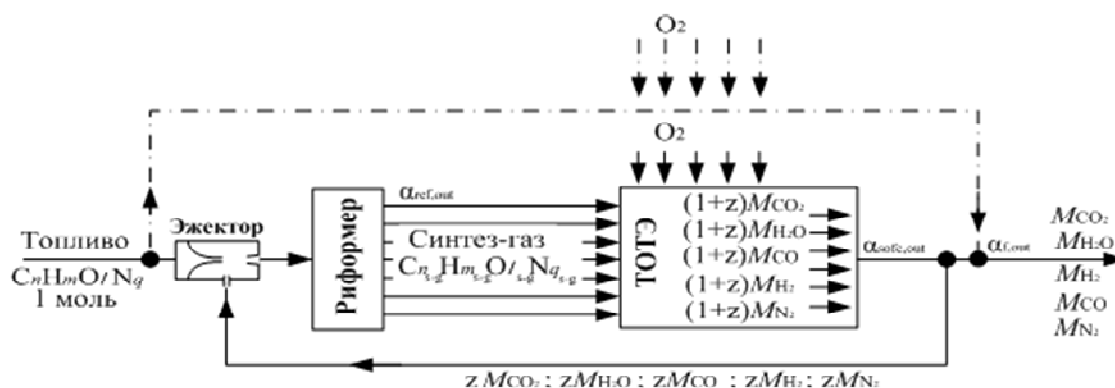


Рис. 1. Схема ТОТЭ с рециркуляцией:  $\alpha_{ref,out}$  – степень поглощения кислорода на выходе из риформера;  $\alpha_{f,out}$  – степень поглощения кислорода топливом на входе в риформер (метаном) на выходе из батареи,  $\alpha_{sofc,out}$  – степень поглощения кислорода синтез-газом из риформера на выходе из батареи ТОТЭ

Для вычисления коэффициента инжекции на основании вышеописанной методики количества компонентов топлива и конвертированного газа домножались почленно на соответствующие молярные массы. Таким образом находились приведённые массовые расходы соответствующих потоков. Далее, на основании уравнения сохранения массы для риформера находился приведённый массовый расход инжектируемого потока, откуда сразу высчитывался коэффициент инжекции.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента инжекции от степени поглощения кислорода  $\alpha_{sofc,out}$  в ТОТЭ. Было установлено, что температура в риформере и батареях ТОТЭ не влияет на коэффициент инжекции.

Расчет выполнен для следующих условий:

- КПД энергетической установки: 0,4;
- теплота сгорания топлива: 35850000 Дж/м<sup>3</sup>;
- полезная мощность: 2000 Вт;
- степень поглощения кислорода  $\alpha_{sofc,out}$  в ТОТЭ находится в диапазоне от 0,6 до 0,8, так как это обусловлено конструкцией планарных твердооксидных топливных элементов;
- плотность метана (НУ): 0,7143 кг/м<sup>3</sup>;

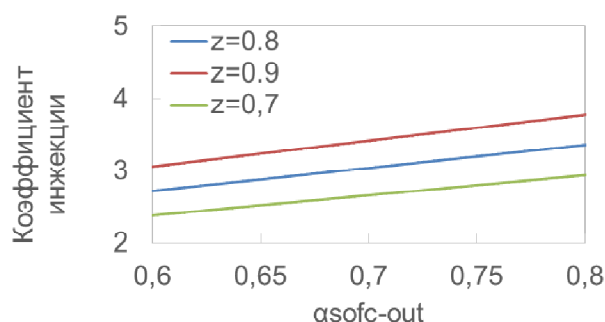


Рис. 2. Зависимость коэффициента инжекции от степени поглощения кислорода в ТОТЭ  $\alpha_{sofc,out}$  для степени рециркуляции  $z = 0,7; 0,8; 0,9$

Из рис. 2 видно, что с ростом коэффициента поглощения кислорода в ТОТЭ коэффициент инжекции увеличивается, для всех расчетных степеней рециркуляции. Кроме того, чем меньше степень рециркуляции, тем меньше коэффициент инжекции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная в статье методика расчета параметров для определения режимов работы энергетических установок на ТОТЭ при рециркуляции анодных газов позволяет получить основные характеристики, такие как: состав уходящих анодных газов, степень рециркуляции, обеспечивающую работу риформера без сажеобразования, а также коэффициент инжекции эжектора, который находится в диапазоне от 2,4 до 3,8 для режимов работы без сажеобразования при  $0,6 < \alpha_{f,out} < 0,8$  и  $0,7 < z < 0,9$ . На основании данного исследования планируется провести конструктивный расчёт эжектора, а также разработать способы его регулирования в составе энергоустановки на ТОТЭ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баскаков А.П., Волкова Ю.В. Физико-химические основы тепловых процессов. М.: Теплотехник, 2013. 173 с.
2. Thijssen J. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). P.O. Box 880 Morgan-town : EG&G Technical Services, Inc. US-Department of Energy, Office of Fossil Energy., 2004. P. 458.
3. Волкова Ю. В. Разработка адаптированной к инженерной практике методики расчета энергетических характеристик установок с твердооксидными топливными элементами: дис. ... канд. техн. наук. М.: УрФУ, 2016.
4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд. переработ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.